



東南大學 能源与环境学院
Southeast University School of Energy and Environment

反应堆控制及核电站仪控系统

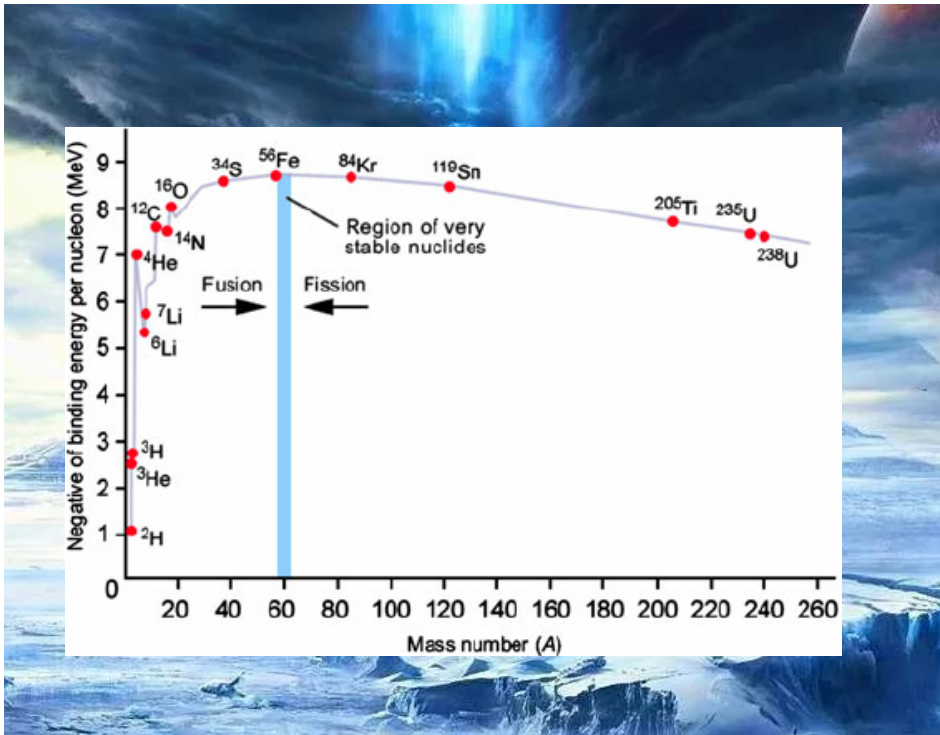
核工程与核技术本科专业课

陈 达 核科学与技术系

2023年2月27日

为什么要学习这门课程

我们从流浪地球谈起.....



行星发动机

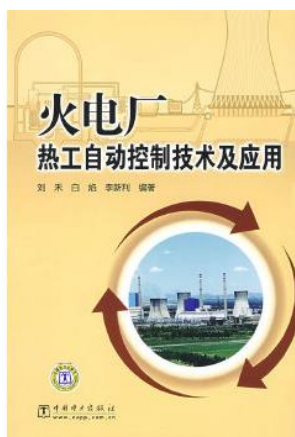


人工智能：MOSS

本课程教学安排

- 授课教师：陈达、黄东篱
- 上课时间：周一3、4节，星期四 1-2节（双周）
- 上课地点：九龙湖校区，教六-300
- 考核方式：平时成绩（考勤/课后作业）20%；期末考试 80%
- 参考教材：

压水堆核电站过程控制系统. 庞松涛主编，中国电力出版社，2014



本课程教学内容

第一章 绪论（陈达）

第二章 热工对象与PID控制（黄东篱）

第三章1 串级控制系统（黄东篱）

第三章2 导前微分双回路系统（黄东篱）

第三章3 前馈-反馈控制系统（陈达）

第三章4 比值控制系统（陈达）

第三章5 大迟延控制系统（陈达）

第三章6 多变量控制（陈达）

复杂系统控制理论

第四章 蒸汽发生器水位控制系统（陈达）

第五章 稳压器控制系统（陈达）

第六章 反应性控制（黄东篱）

第七章 负荷控制（黄东篱）

反应堆控制系统

第一章 绪论

1.1 热工控制系统的发展历程

1.2 核电站主要控制系统

1.3 热工自动控制的主要内容和分类

1.4 热工自动控制系统品质指标

1.1 热工控制系统的发展历程

阶段	大致时间	控制理论和研究方法	过程控制研究对象	采用的仪表
第一阶段	20世纪40-50年代	经典控制理论 微分方程解析方法	控制系统稳定性，单输入、单输出系统	基地式大型仪表 部分气动单元组合仪表
第二阶段	20世纪50-60年代	经典控制理论 频域法、根轨迹法等	从随动到定值控制；从单回路到复杂控制；从PID到特殊控制规律	基地式仪表为主，大量应用气动单元组合仪表
第三阶段	20世纪60-70年代	现代控制理论 状态空间、动态规划、极小值原理等	复杂控制系统的开发和应用。在航天、航空和制导等领域取得成功	组合式仪表广泛应用，气动和电动单元组合仪表成为控制仪表的主流
第四阶段	20世纪70-80年代	大系统控制理论、人工智能、鲁棒控制、模糊控制、神经网络、预测控制、多变量频域	基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、智能控制、故障诊断、生产计划和调度、优化控制等先进控制系统，非线性和分布参数系统	集散控制系统（DCS）、可编程控制器（PLC）、信息管理系统（MIS）
第五阶段	20世纪80年代开始	管控一体化、综合自动化 过程控制系统、制造执行系统和企业资源计划结合	综合自动化系统（PCS, MES, ERP） 网络集成、数据集成，直到信息集成和应用集成 先进过程控制（APC）、卓越运行操作（Opx）	现场总线控制系统（FCS）、无线仪表、网络化仪表

自动控制理论的发展

1.1 热工控制系统的发展历程

火电厂热工控制方式主要经历了三个发展阶段：

1. **独立控制**：机、炉、电各自独立地进行控制，机、炉、电及重要的辅机各自设置一套控制表盘，它们之间无联系。调节仪表为大尺寸笨重的就地式，运行人员进行监视与控制。国外在20-40年代，我国50年代的火电厂属该类型。
2. **集中控制**：上世纪40年代以后，由于中间再热式汽轮机的出现，使锅炉和汽轮机之间的关系更加密切。为了便于机炉协调运行和事故处理，将控制盘集中安装在一起，对机炉实行集中控制。集中控制的初期，调节仪表采用电动或气动单元组合仪表。50年代后，采用组件仪表或以微处理机为核心的数字调节器，对机炉进行集中控制。
3. **集散控制系统**：火电厂生产过程实现最优控制与速度自动化相结合的多级计算机控制。60年代至今，国际上火电厂都朝着这方向发展，国外引进、国内制造的火电厂机组已达到这一水平。

技术装备的不断进步

1.1 热工控制系统的发展历程

目前世界核电站的仪控系统主要包括三类：

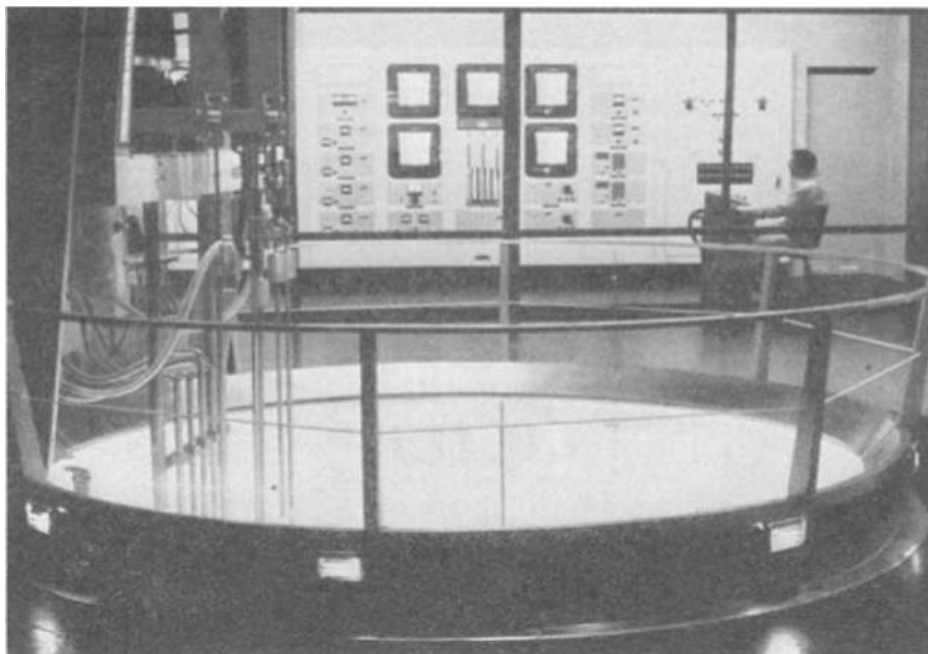
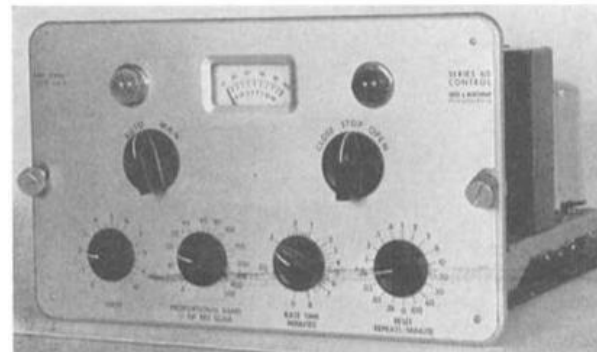
第一类：采用**常规的模拟控制仪表系统**，这是目前大多数核电站的情况；

第二类：**模拟和数字混合的控制仪表系统**，即非安全系统仍采用常规的控制和仪表技术，1E级安全保护系统采用数字化的控制仪表系统

第三类：**采用全部数字化的控制和仪表系统**，目前只有为数不多的核电站采用这种最先进的控制仪表技术，这些核电站计有法国的N4型1450MWe核电站，美国西屋公司提供技术的SizewellB，Temelin units 1&2，GE公司的ABWR，ABB-CE的System 80+等。我国连云港核电站也采用了西门子Teleperm分布式仪表控制系统，数字化分布式仪表控制系统在核电中的应用是核电新技术的重要分支，是核电发展的必然趋势。

1.1 热工控制系统的发展历程

50-60年代，核电站和试验堆采用模拟仪控系统，算法仅采用PID算法。



1.1 热工控制系统的发展历程

60-70年代，试验堆或核电厂采用集成电路实现的计算机控制系统，以及采用可编程控制实现系统的控制。

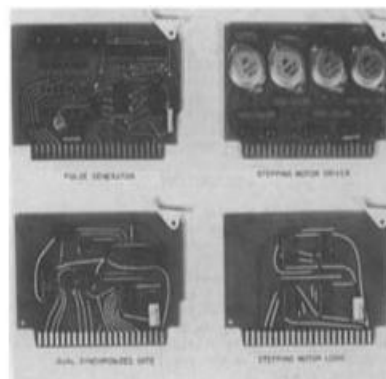
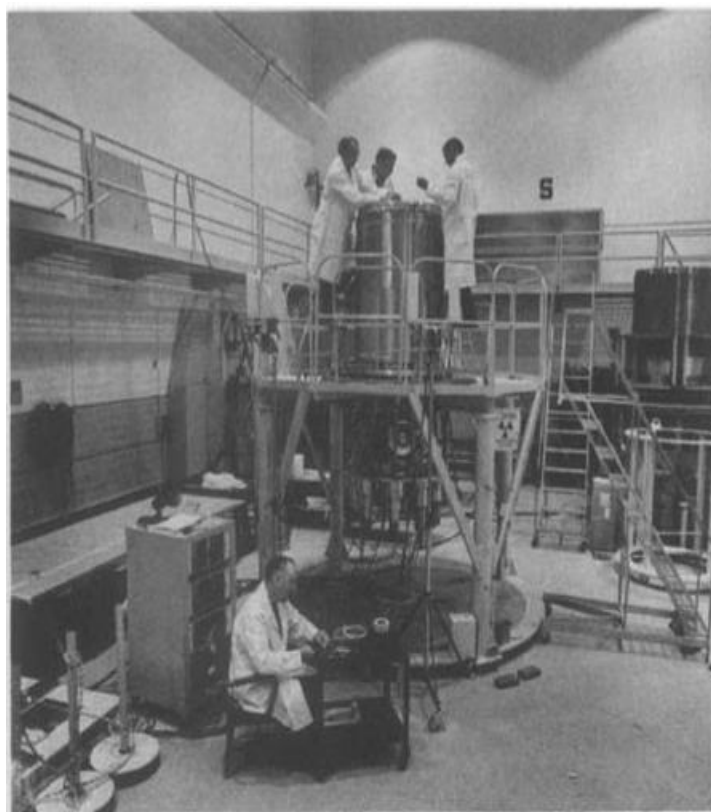


Fig. 4. Actuator Control Cards

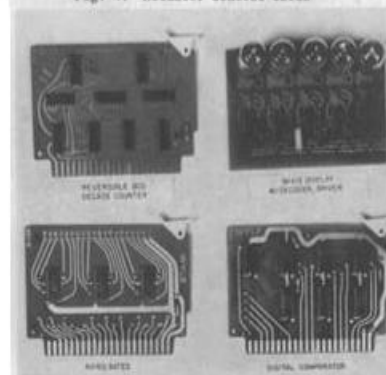
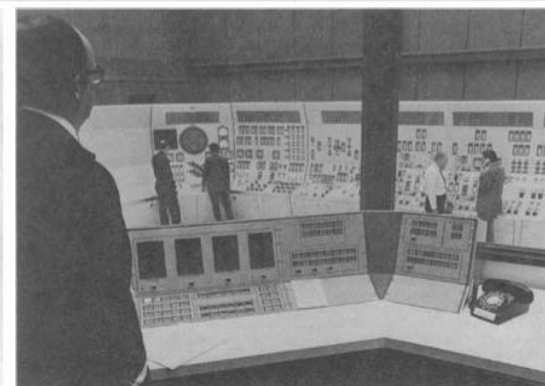
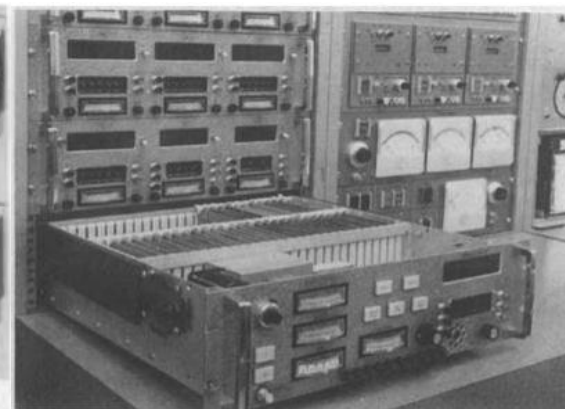


Fig. 5. Bidirectional Counter Cards



1.1 热工控制系统的发展历程

80-90年代，核电站逐步发展仪控系统数字化；2000年后，全数字仪控系统在核电站广泛应用。



山东海阳核电厂AP1000机组的数字化仪控系统

1.1 热工控制系统的发展历程

现阶段应用比较典型的全数字化仪控系统有：日本日立等公司开发的**NUCamm - 90系统**、三菱公司的**MELTAC N+系统**、ABB公司的**NUPLEX 80+系统**、美国西屋公司的**CommonQ+Ovation系统**以及我国田湾核电站所采用的德国西门子公司的**TELEPERM XP+XS系统**等。

我国目前可实现数字仪控的厂家：广利核、浙江中控、和利时、核动力院、国核自仪、上自仪等。

第一章 绪论

1.1 热工控制系统的发展历程

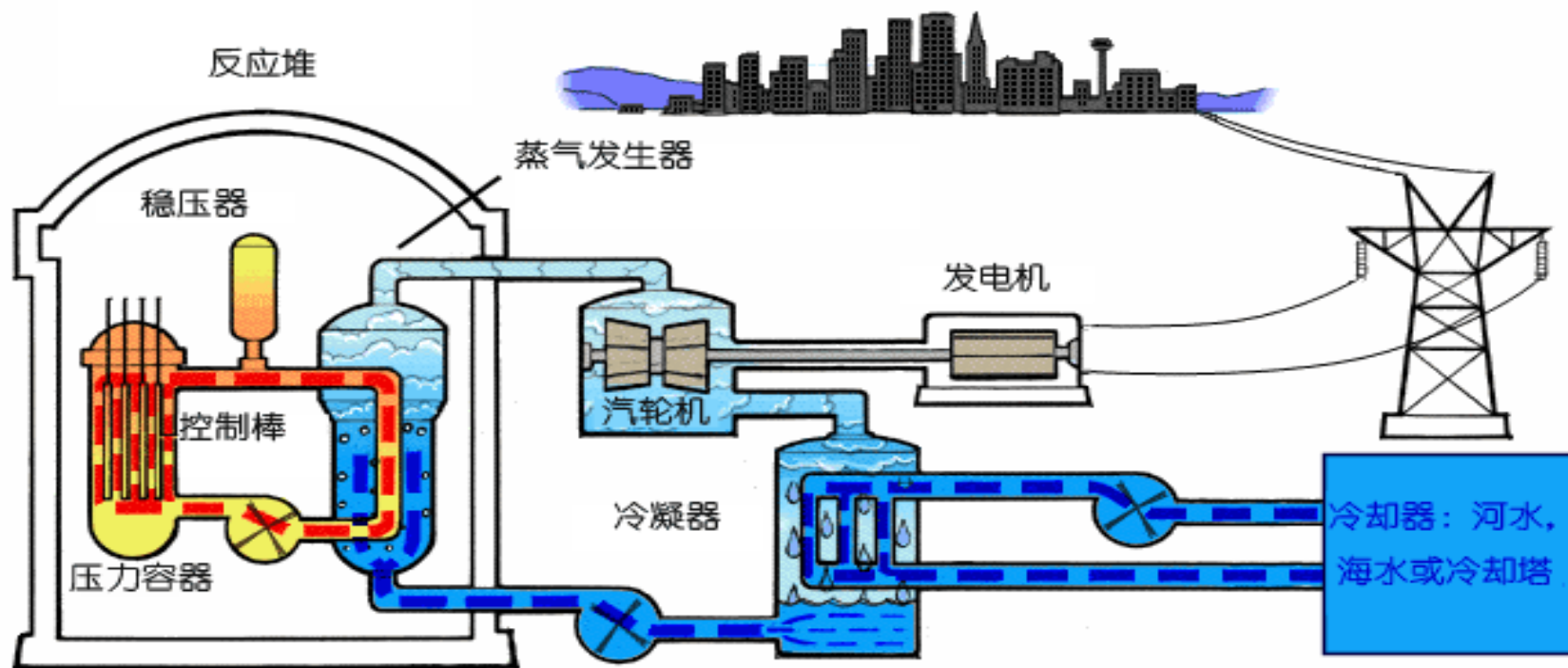
1.2 核电站的主要控制系统

1.3 热工自动控制的主要内容和分类

1.4 热工自动控制系统品质指标

1.2 核电站的主要控制系统

核电站是一个工艺原理和过程复杂、结构庞大、具有各种用途的高科技工业系统，同时它又是一个具有放射性的特殊对象。为了保证**安全、可靠和经济地**实现核能的利用，系统除了必要的用于能量传递和转换的工艺系统和设备外，还有**仪表与控制系统（简称仪控系统）**。



1.2 核电站的主要控制系统

仪表与控制（I&C）系统包括**仪表系统**、**控制系统**和**保护系统**：

- 仪表系统用于测量过程参数以监测核能系统的运行状态；
- 保护系统的目的是防止某些过程参数偏离正常值而导致事故的发生，限制事故发生后所产生的后果。
- **控制系统的功能：**（1）监测核电厂所有核参数及过程参数，为控制系统和保护系统提供信号与显示；（2）用于核反应堆的启动、停堆、升功率、降功率以及维持核反应堆稳态运行功率水平等功率调节；（3）实现功率分布的控制，使核反应堆处于良好的安全性和经济性状态下运行；（4）抵消剩余反应性，补偿在运行中由于温度变化、中毒和燃料等所引起的反应性变化；（5）实现对核电厂过程参数的自动控制。

1.2 核电站的主要控制系统

压水堆核电厂的控制系统主要组成：

- **核反应堆功率控制系统：**功率控制系统的主要功能是根据负荷需求控制功率补偿棒组的位置，所以也称为功率补偿棒组控制系统，目标是使功率补偿棒组的位置与功率相对应。
- **核反应堆冷却剂平均温度控制系统：**反应堆冷却剂平均温度控制系统的功能是通过调节冷却剂平均温度实现核反应堆功率与负荷的精确匹配。
- **硼浓度控制系统（属核反应堆辅助系统——化学与容积控制系统）：**通过调节慢化剂中可溶性中子吸收剂 ^{10}B 的浓度的方法补偿和调节堆芯的反应性和负荷跟踪过程中氙毒引起的慢变化反应性。调硼的好处；① 减少了控制棒数量；② 改善了轴向功率分布；③ 可增大核反应堆后备反应性，使堆寿期延长，燃耗增加；④ 简化堆芯结构。

1.2 核电站的主要控制系统

压水堆核电厂的控制系统主要组成：

- **核反应堆稳压器压力和液位控制系统：**使一回路压力维持在设定值上，压力过大，易发生设备疲劳和管道破裂等事故。压力过低，引起堆芯局部沸腾，燃料元件与冷却剂传热恶化。稳压器的液位控制使稳压器液位维持在一个适宜的设定值上。液位过高会使压力控制效果变差，也有可能出现安全阀进水的危险;液位过低有可能暴露加热元件而出现被烧毁的危险。
- **蒸汽发生器液位控制系统和给水流量控制系统：**如果蒸汽发生器液位低，会有下列危险：①引起蒸汽进入给水环，从而将在给水管道中产生危险的汽锤;②引起管束传热恶化;③引起蒸汽发生器的管板热冲击。如果液位高会有淹没人字干燥器的危险，使蒸汽干度降低而危害汽轮机叶片。蒸汽发生器液位调节系统是由蒸汽流量，液位偏差和给水流量组成三参量的调节系统。

1.2 核电站的主要控制系统

压水堆核电厂的控制系统主要组成：

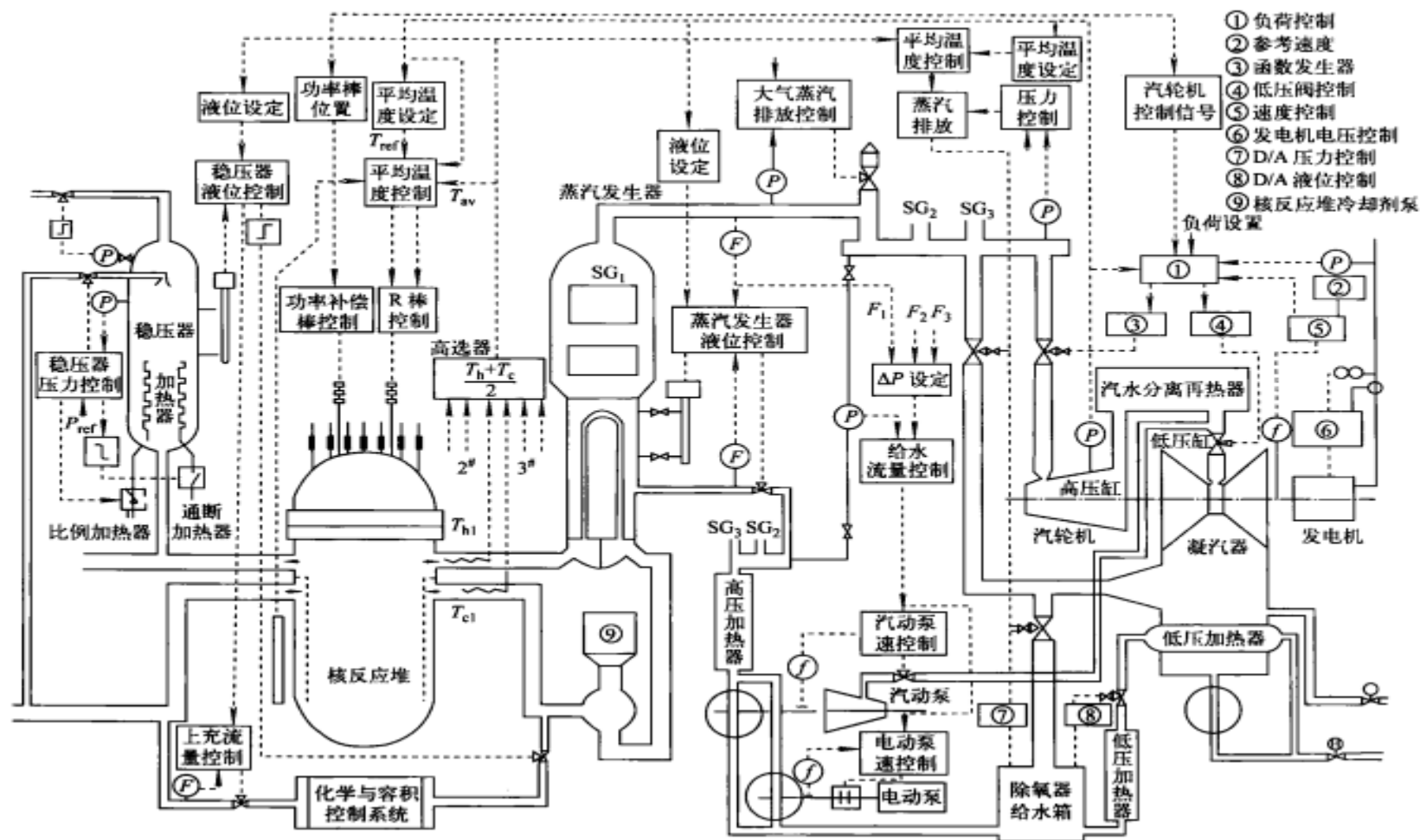
- **蒸汽排放控制系统：**在汽轮机快速降负荷时，由于核反应堆功率不能像汽轮机负荷那样快速地变化，采用直接向凝汽器和除氧器或向大气排放蒸汽的方法，提供一个“人为”的负荷。通过排放蒸汽减缓核蒸汽。供应系统温度与压力瞬态的变化幅度。蒸汽排放包括向凝汽器和除氧器的蒸汽排放以及向大气的蒸汽排放，是由蒸汽排放控制系统实现蒸汽排放控制的。它是功率控制系统的辅助系统，根据一回路冷却剂平均温度和二回路压力的变化控制相应的蒸汽排放阀。
- 汽轮机调节（负荷控制）系统；
- 发电机控制系统等。

1.2 核电站的主要控制系统

压水堆核电厂的控制系统主要组成：

- 核反应堆功率控制系统：（核功率粗调）
 - 核反应堆冷却剂平均温度控制系统：（核功率细调）
 - 硼浓度控制系统；（核功率慢调）
 - 核反应堆稳压器压力和液位控制系统：
 - 蒸汽发生器液位控制系统和给水流量控制系统：
 - 蒸汽排放控制系统（功率快匹配）
 - 汽轮机调节系统（外部负荷响应）
 - 发电机控制系统等（外部负荷响应）
- } （调节系统稳定运行）

1.2 核电站的主要控制系统



压水堆核电厂控制系统总图

第一章 绪论

1.1 热工控制系统的发展历程

1.2 核电站的主要控制系统

1.3 热工自动控制的主要内容和分类

1.4 热工自动控制系统品质指标

1.3 热工自动控制的主要内容和分类

一、基本概念

- **热工**：是**工程热力学**与**传热学**的简称。其中工程热力学主要是研究热力学机械的效率和热力学工质参与的能量转换在工程上的应用，如将热力学能转化成机械能推动动力机械做功以及其效率的学科，；而传热学是研究热量传递的一门学科，如反应堆的导热，对流换热，辐射能的传递等。

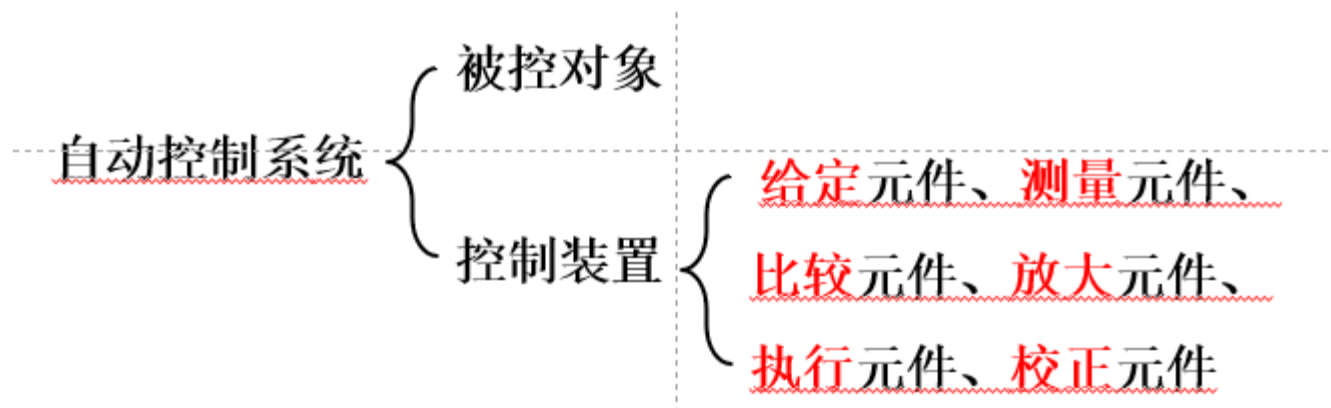
- 热工控制的主要物理参数：

温度、流量、压力、液位……

1.3 热工自动控制的主要内容和分类

一、基本概念

- **自动控制**：指在没有人直接参与的情况下，利用控制器（控制装置），使被控对象（或过程）的被控量（物理量或状态）自动地按照预定的规律运行。
- **自动控制系统**：指承担控制任务的被控对象和控制装置的总体。



1.3 热工自动控制的主要内容和分类

二、主要内容

- **自动监测**：自动的检查和测量反映生产过程运行情况的各种物理量、化学量以及生产设备的工作状态，以监视生产过程的情况和趋势。
- **顺序控制**：根据预先拟定的程序和条件，自动的对设备进行一系列的操作
- **自动保护**：在发生事故时，自动采取保护措施，以防止事故的扩大。
- **自动调节**：自动维持生产过程在规定的工况下进行。

本课程主要讨论自动调节问题，它是属于自动控制的一部分，对生产过程的正常进行有很大影响，只要生产过程中受到各种因素的干扰和影响，使工况偏离正常，自动调节就会发挥其功能，以迅速消除干扰，使生产过程恢复正常运行。

1.3 热工自动控制的主要内容和分类

三、分类

自动控制系统有多种分类方法：

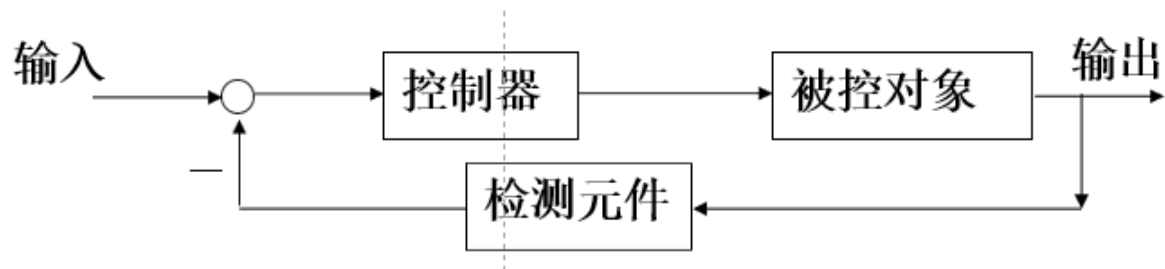
- 按结构可分为：闭环控制系统、开环控制系统
 - 按变量数目可分为：单变量控制系统、多变量控制系统
 - 按回路数目可分为：单回路控制系统、多回路控制系统
 - 按给定值不同而类型：定值控制、随动控制、程序控制等等
 - 按系统使用的动力类型可分为：电气，液压、气动控制系统。
- 此外，还可以按系统的功用和性能进行分类。

1.3 热工自动控制的主要内容和分类

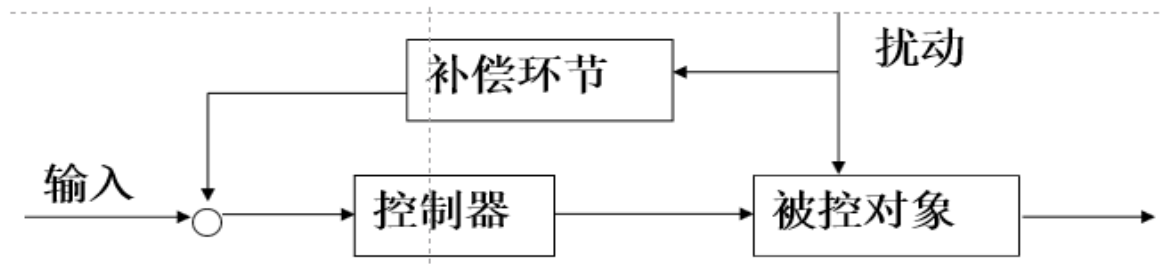
三、分类

(一) 按系统结构特点分类：反馈控制系统和前馈控制系统

反馈控制系统
(闭环)



前馈控制系统
(开环)



1.3 热工自动控制的主要内容和分类

(二) 根据生产过程要求保持的被调量给定值不同类型可分为：

1. 定值控制系统：

在运行时被调量的给定值恒定不变，也就是被调量保持为某一固定数值。这是热工调节中应用最多的一种自动控制系统-定值控制。

2. 程序控制系统：

被调量的给定值是预定的时间函数。例如，在汽轮机启动时，希望转速随时间成一定的函数关系变化，这就要求用程序控制系统。

3. 随动控制系统：

被调量的给定值决定于某些外来的因素而不是预先拟定的。

例如：在汽轮机启动过程中最优升速控制，转速的升速率不是预先给定的而是按汽温（主蒸汽、再热蒸汽）、汽缸壁温、差膨、振动等情况确定的，它是某个外部条件的控制函数。

4. 比值控制系统：系统维持两个变量之间的比值为一定数值。

第一章 绪论

1.1 热工控制系统的发展历程

1.2 核电站的主要控制系统

1.3 热工自动控制的主要内容和分类

1.4 热工自动控制系统的品质指标

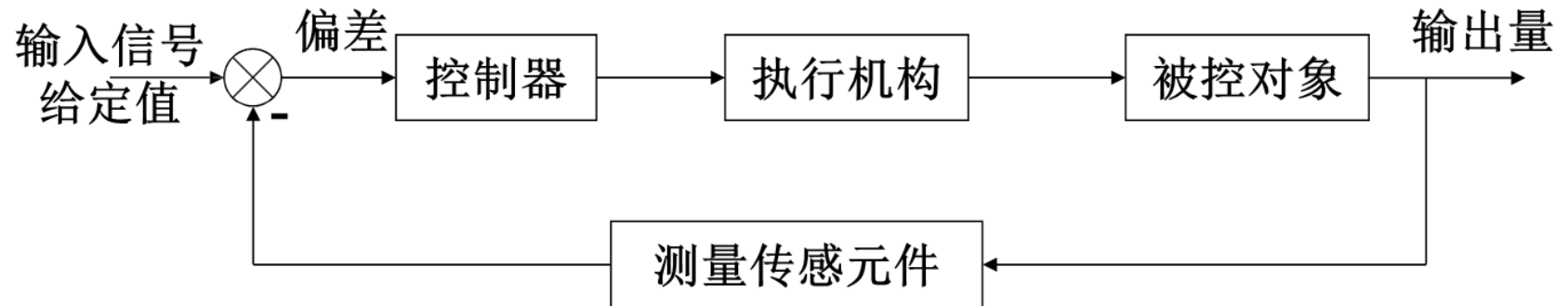
1.4 热工自动控制系统的品质指标

自动控制系统性能的基本要求

1. **Stability** ——— 稳定性
2. **Accuracy** ——— 准确性
3. **Quickness** ——— 快速性

1.4 热工自动控制系统品质指标

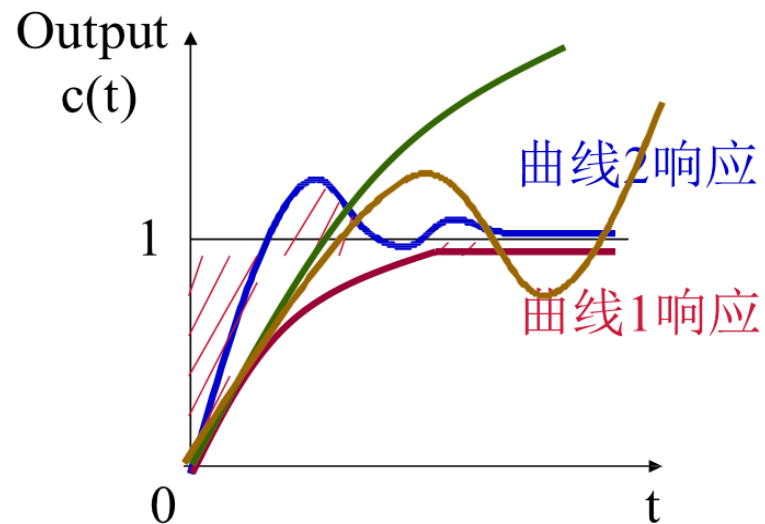
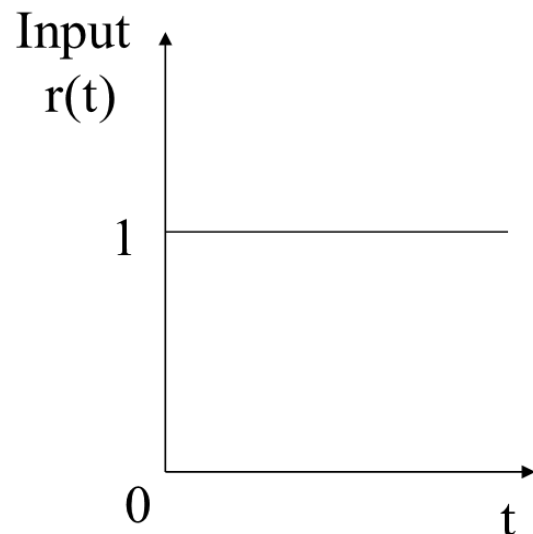
阶跃输入函数从零阶跃到一个恒定值，通常作为典型输入信号来研究系统性能。



当输入信号突然发生跳变时，这时输出量还处在原有的平衡状态，这样就出现了偏差，这个偏差控制输出量达到新的平衡，这就是一个 **regulation process**（调节过程）。

1.4 热工自动控制系统的品质指标

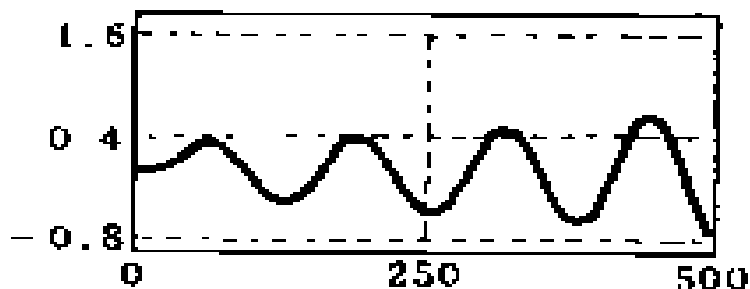
理想的调节过程是：出现偏差后，执行机构突然动作，使输出量立即达到新的平衡状态，调节过程瞬时完成，实际上这是不可能的，为什么呢？



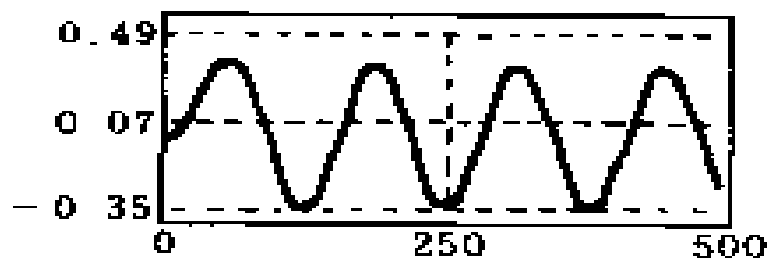
曲线 1 单调增加到稳态值。 曲线 2（衰减）振荡到稳态值。

1.4 热工自动控制系统品质指标

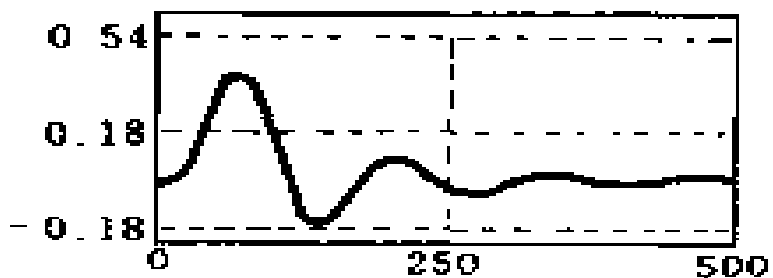
系统从原平衡状态到达新的平衡状态都要经历一个过渡过程，**过渡过程的曲线形状随系统的不同而有所差异。**



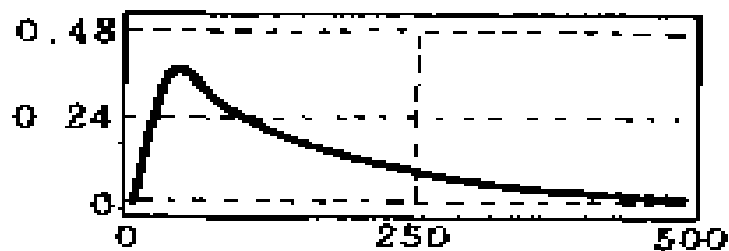
发散振荡 (a)



等幅振荡 (b)



衰减振荡 (c)

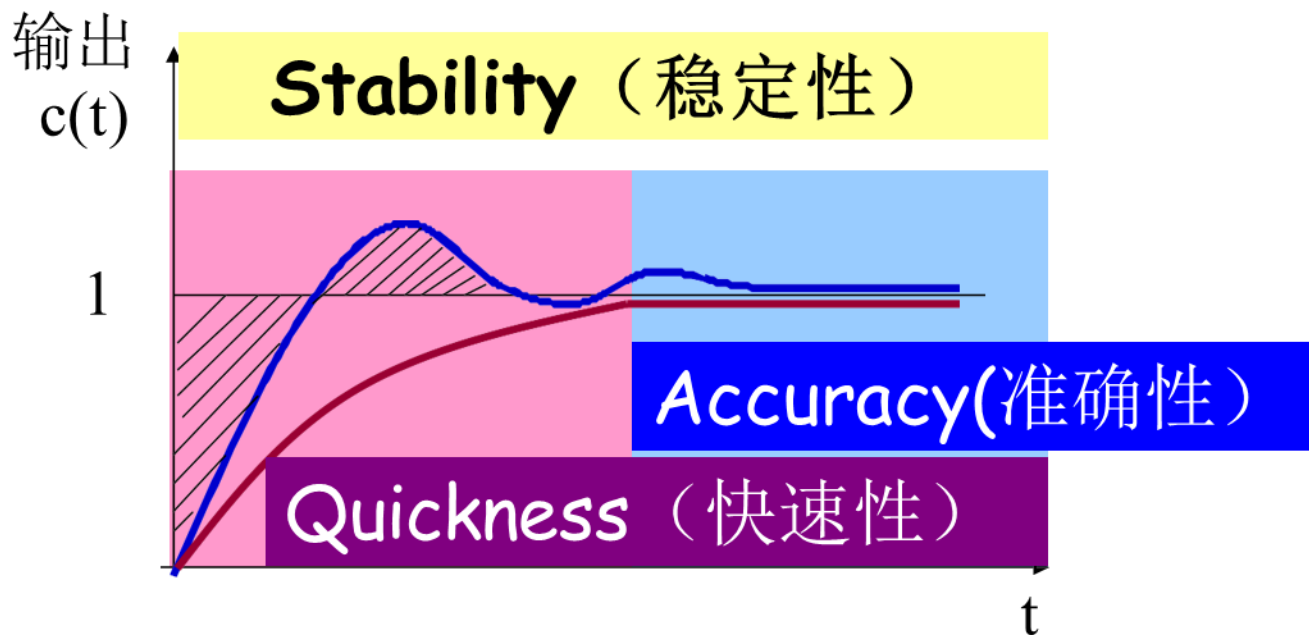


非周期振荡 (d)

1.4 热工自动控制系统品质指标

Transient process (瞬态过程) 反映 **dynamic character (动态特性)**，即输出量处于激烈变化之中。

Steady-state process (稳态过程) 反映 **steady-state character (稳态特性)**，即输出量稳定在新的平衡状态并保持不变。

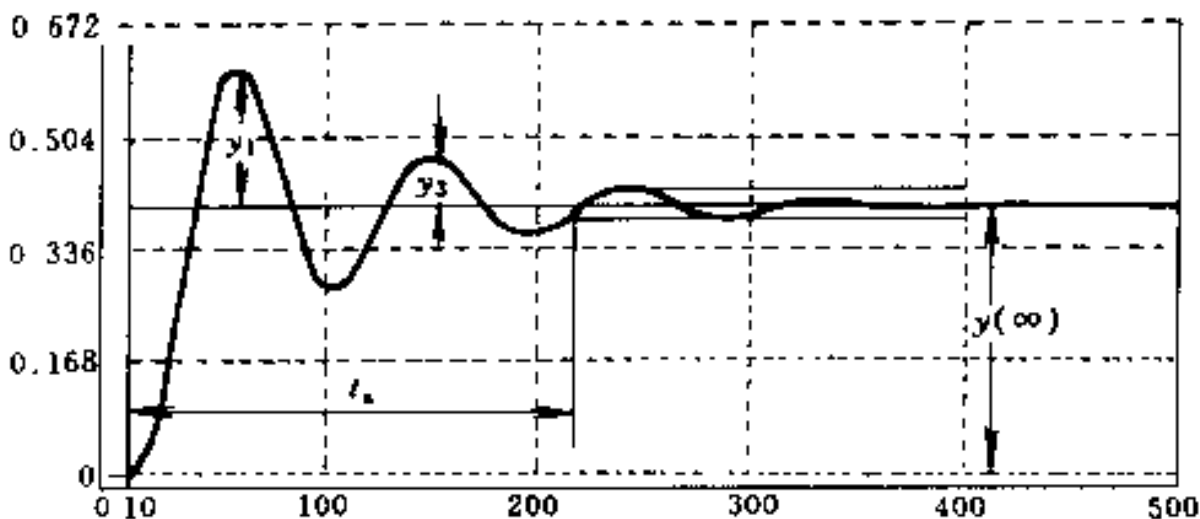


1.4 热工自动控制系统品质指标

时域指标:

静态——稳态误差: 是指被调量的稳态值与给定值之间的长期偏差。它反映了 控制系统的调节精度。

动态——衰减率: 经过一个波动周期, 被调量波动幅值减少的百分数。**最大动态偏差或超调量**: 调节过程中被调量偏离给定值最大暂时偏差。**调节时间**: 从被调量受到扰动, 过程开始变化直到结束所需要的时间。



1.4 热工自动控制系统品质指标

稳定性：指系统恢复平衡的能力，即瞬态过程的收敛。
(稳)

快速度：指瞬态过程的持续时间。(快)

准确性：指瞬态过程结束时稳态误差的大小。(准)

(稳态误差=期望输出-实际输出)

注意：对于一个控制系统来说，上述三个性能指标（稳定性、快速性、准确性）有时是相互矛盾的。

第一章 思考题

- 1、核电站的仪控系统包括那三类？
- 2、核电站控制系统主要包括哪几大系统？各系统的功能是什么？
- 3、热工自动控制的主要内容是什么？
- 4、衡量一个控制系统的时域性能指标有哪些？
- 5、有几种典型的调节过渡过程？请图示出来。

本章结束！